

新方式 ECT プローブの開発

廣田 章博*, 早野 誠治, 齋藤 兆古 (法政大学)

Development of a New ECT Probe based on the Current Viewer Principle

Akihiro Hirota, Seiji Hayano and Yoshifuru Saito (Hosei University)

Abstract

Eddy current testing (ECT) does not require any direct contact and can be composed of a relatively simple mechanical structure. Further, it is possible to carry out the nondestructive testing with high speed. Thereby, ECT is widely applied to the maintenance works of various fields.

Previously, we have proposed the current viewer based on the Ampere's law. This current viewer has theoretically infinite high-resolution capability searching for the current flowing paths in the printed circuit boards (PCBs). Furthermore, we have developed the vector current viewer, which makes it possible to on-line visualization of the current distributions on the PCBs.

Principal purpose of this paper is to check up the possibility of our current viewer as a new ECT probe. As an initial test, we have carried out several experiments to identify the cracks in metallic materials, e.g. aluminum and copper.

キーワード: ECT, 差動コイル, 磁気センサー
(Eddy current testing, differential type coils, magnetic sensor)

1. はじめに

エレベータやエスカレータ, 航空機, さらに原子炉などの機械的構造の主要構成材料である金属材料の非破壊検査は安全性確保のために極めて重要な技術である。また, 金属そのものの品質評価要素として, 材料の均一性, ゆがみ, たわみなどがあり, これらの要素を評価する手段としての非破壊検査技術もある。いずれの非破壊検査においても最も重要な具備すべき大きな特徴は高信頼性, 検査の高速実行性, さらに取り扱いの容易さにある。

金属の非破壊検査法には, 超音波, 放射線, 電気抵抗, 渦電流などを利用した方法が知られている。この中で, 超音波による非破壊検査法は比較的, 精度のみならず信頼性も高い反面, 超音波振動子を検査対象に直接接触させる必要があり, 高速な検査の実行が難しい。同様に, 電気抵抗測定による非破壊検査法も検査対象へ直接接触の必要性がある。他方, 放射線を用いた非破壊検査法は, 検査対象へ非接触で検査を可能とする。しかし, 放射線を用いた非破壊検査は安全性の観点から装置の取り扱いに一定の法的基準が課せられている。渦電流を利用した非破壊検査法は検査対象へ直接接触する必要がなく, 比較的簡単な装置で高速な作業が行える反面, 渦電流の流れる方向によっては金属中の欠損を探知できない問題点もある。しかしながら, 比較的簡単な機械・電氣的構造で構成され, 信頼性が高いため, 主として厳格な安全性の確保や検査の迅速性が必要な原子炉など様々な分野において広汎に用いられている[1]-[4]。

筆者らは, 主としてプリント基板上の電流分布, すなわち, 電子回路の健全性を非破壊的・非侵襲的に行うため, 変形ロゴスキーコイルを用いたカレントビューアを提唱し, 平面回路上の電流分布探査を試みた。カレントビューアは電流と磁界間の基本的な関係で有るアンペアの周回積分の法則を直接利用することから, 理想的に実現できれば理論上無限大の解像度で平面状の電流分布が探査可能で有る。さらに, 筆者らはオンラインで平面状電流分布の大きさと方向を可視化可能とするベクトルカレントビューアを試作し, 基本的な動作原理の検証を行ってきた[5]-[7]。このような, 筆者らが従来から提唱し, 動作原理を検証してきたカレントビューアやベクトルカレントビューアは平面状に分布する電流が生成

する磁界を受動的 (パッシブ) に感知する方式である。

本論文では, 従来から筆者らが開発してきたカレントビューアやベクトルカレントビューアへ励磁コイルを装着し, 被検査対象で有る平面状金属に喚起される渦電流の分布をカレントビューアで検出するアクティブ型のエディカレントビューアやベクトルエディカレントビューアを提案し, 初期的な実験を行ったので報告する。

従来のECTプローブは, プローブが発生する交流磁界に喚起される渦電流分布で, 検査対象中の欠損の有無に起因する渦電流分布の相違をプローブの入力インピーダンスの変化として探査する。本論文で提案する新方式ECTプローブ, すなわち, アクティブ型エディカレントビューアは独立した励磁コイルとセンサーコイルからなる。このアクティブ型エディカレントビューアは円弧状の2脚からなり, 脚の両端に装着された励磁コイルは平面状対象金属に渦電流を喚起し, 検査対象中の渦電流分布の差異を独立に装着された差動コイルで検出する。このため, アクティブ型エディカレントビューアの両脚下の渦電流が異なる場合, 差動コイルに出力電圧が得られ, 両脚下の何れかに欠損, 若しくは異なる材料であることが検知される。すなわち, アクティブ型エディカレントビューアの両脚に装着された励磁コイルの生成する磁界に対する応答を空間的ブリッジである差動コイルで検出する原理に基づく。本論文では, これらの動作原理を初期的な実験で検証する。

2. 新方式 ECT プローブ

2. 1 センサーの形状

通常, ループ状ソレノイドコイルを用いたサーチコイル法による磁界測定で高解像度を実現する場合, 巻き数を増加し断面積を小さくする必要がある。さらに, サーチコイルは電流近傍へ位置する必要がある。

他方, 筆者等は電流に起因する磁界の検出感度向上を図るため, 形状が半円弧状の変形ロゴスキーコイル型カレントビューアを提案した。その結果, 通常のソレノイド型サーチコイルに比較して, 筆者らの提案するカレントビューアは遥かに高解像度で磁界を測定可能とした。図1にカレントビューアの動作原理を示す。図1に示すカレントビューアの両脚に同

方向へ磁束を生成する励磁コイルを装着し、さらに両脚の磁束の相違を検出するため、差動コイルを同軸上に設ける。

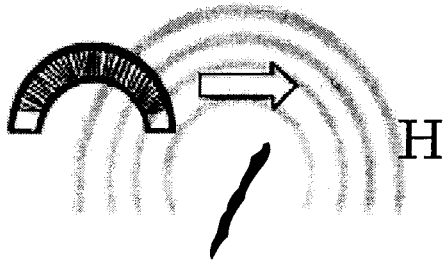


図1 カレントビューアの動作原理
Fig. 1 Operating principle of the current viewer

2. 2 差動コイル磁気センサー

磁気センサーは大きく分けて材料の特性を利用した、たとえばホールセンサーのような物性応用に基づく形式とコイルを巻いて作成するサーチコイル形式に分類される。ホールセンサーは、AV機器のみならず、コンピュータで代表される映像情報処理機器へ広汎に採用されている。他方、サーチコイル形式は、環境依存性が低く、過酷な環境に耐えられるため、単純な原子炉の熱交換器をはじめ多くの金属構造物に対する非破壊検査に広範に採用されている。これは、ホールセンサーで代表される物性利用型磁気センサーは温度などの環境依存性が高いために装置中に固定して使用されるのに対し、サーチコイル型は環境依存性が殆ど無く、可搬性に富むため、定期的な検査を必要とするエレベータや原子炉などへ適していることに起因する。

サーチコイル型磁気センサーの中で、差動コイル型磁気センサーは出力信号が直接差動コイルで微分演算されるため、信号処理用電子回路への依存性が低く、且つ、高感度である。このため、本論文で提案するセンサーは、差動コイル型磁気センサーを採用した。

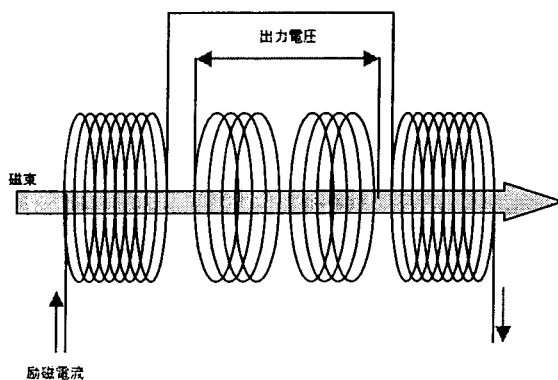


図2 差動コイル型磁気センサー
Fig. 2 Differential type magnetic sensor

差動コイル型磁気センサーの動作原理について簡単に述べる。図2に示す同軸型差動コイル型磁気センサーで、両端の励磁コイルに電流を通電することでコイル軸方向の磁束を形成する。他方、中心に位置するサーチコイルは差動接続され、両者を共通に同一の磁束が貫いた場合、出力電圧は生じない。しかし、サーチコイル間の中心からずれた位置に金属が存在すると、金属中の渦電流に起因する磁束が左右の差

動コイルに平等に鎖交せず、差動接続されたサーチコイルには電圧が誘起する。したがって、差動コイルに誘起する電圧を測定すれば、軸上の導体の位置が検出できる。これが差動コイル型磁気センサーの動作原理である。

2. 3 原理検証実験

表1に試作ECTの諸定数および検査対象金属の寸法等を示す。試作センサーは、図7に示すように、ロゴスキーコイルを利用した半円弧状の差動コイル型磁気センサーである。

試作センサーの動作検証実験として、アルミニウム、銅、鉄板中に人工的にカッターナイフを用いて傷つけた欠損部が感知可能かを吟味した。

センサーが欠損部を跨らず左右に位置する場合と跨らせた場合の固定位置でセンサー出力を測定した。励磁コイルに100kHz、0.5Aを通電した場合の差動コイル出力電圧を図3に示す。欠損部は図4に示すようにセンサーの移動方向へ直角では無く、また、欠損は左右対称なスリット状では無い。

表1 試作ECTプローブの諸定数

Table 1 various constants of the tested ECT probe and the target materials.

	Exciting coils	Search coils
Diameter of the winding coils	0.2[mm]	0.2[mm]
Number of turns	56[turn]	56[turn]
Thickness of the target metallic materials	Aluminum: 0.5[mm] Copper: 0.5[mm] Iron: 0.5[mm]	

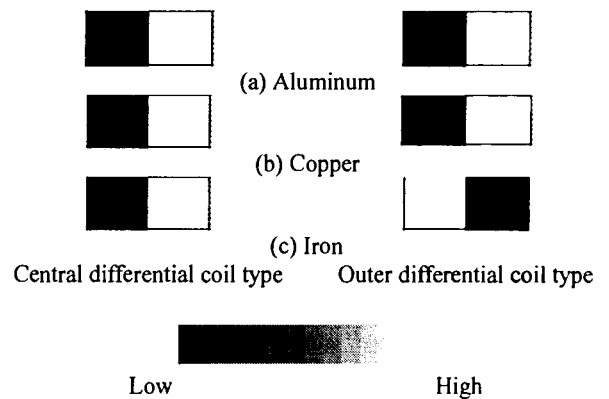


図3 原理検証実験結果

Fig. 3 Experimental verification of operating principle.

図3左列は、励磁コイルをセンサーの両端の脚に配置し、差動コイルをセンサー中心部に配置した場合の結果である。明らかに両脚の一方が欠損部上に位置した場合、大きな差動コイル出力電圧が得られている。図3右列は、励磁コイルを中心部に配置し、差動コイルを両脚の端部に配置した場合の結果である。励磁条件は図3左列と同様である。非磁性体であるアルミニウムと銅に対しては図3左列と同様な結果が得られたが、磁性体である鉄に対しては、差動コイルに鎖交する磁束が渦電流のみに依存せず、強磁性の影響を受けるため、図3左と異なる結果となった。換言すれば、磁性体である鉄板中の欠損を探索する場合、渦電流による磁束分布を支配的にするため、励磁コイルが対象物へ最も接近する方式(左図)が再現性の良い結果を与える。

次に、図4に示すように左方から1cm間隔でセンサーを右方向へ移動させてセンサー出力を測定した。測定範囲は12cmである。供試試験材料と励磁条件は図3と同様である。結果を図5、図6に示す。図5は表面欠損、図6は裏面欠損の場合で有る。

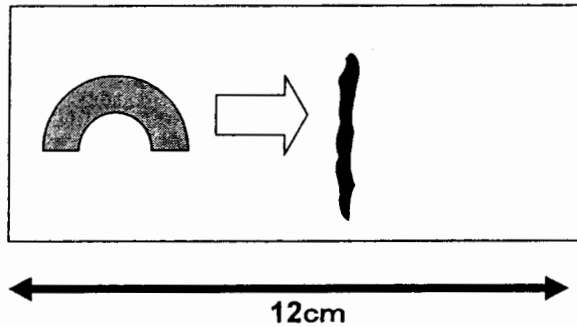


図4 実験方法
Fig. 4 Schematic diagram of experiment.

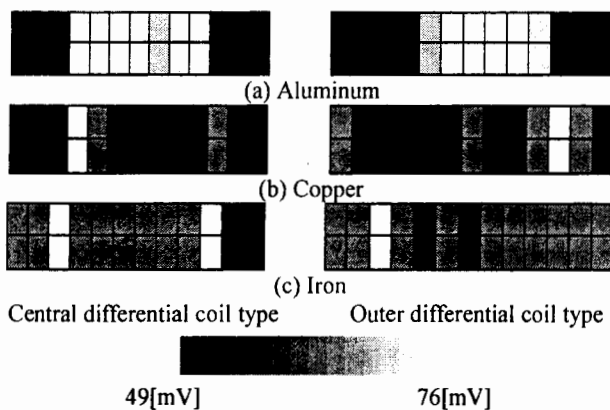


図5 表面欠損が有る場合のセンサー出力電圧分布
Fig. 5 Output voltage distributions along the surface having defect.

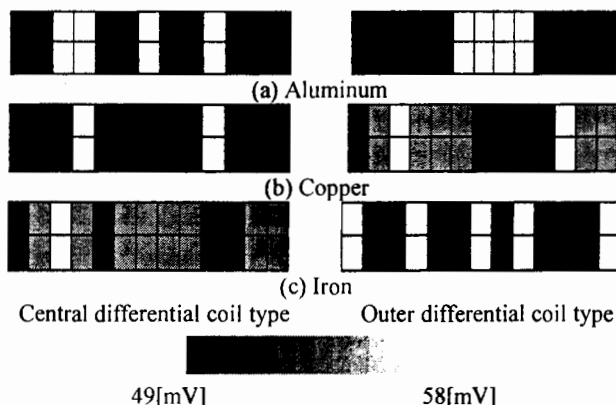


図6 背面欠損が有る場合のセンサー出力電圧分布
Fig. 6 Output voltage distributions along the surface having backside defect.

図5の結果は、励磁コイルがセンサー脚の両端に位置し、検査対象金属の表面に接近している中心差動コイル型が比較的良好な結果を与えることを示している。出力電圧分布が

左右対称で無いのは欠損が直線的で無く、且つ、欠損が非対称で有ることに起因する。さらに、試作したセンサーのコイル配置の機械的誤差などにも起因する。何れにしろ、左右の脚が欠損上を通過する場合、2回比較的大きな出力が得られ、これは従来のECTプローブに対して、筆者らの提案するプローブが1欠損に対して2回の走査を可能とし、高信頼性が確保されることを意味する。他方、端部差動コイル型は、励磁コイルが対象金属に面していないため、必ずしも1欠損に対して2回走査が可能ではない。

図6の結果は、背面欠損に対しても、中心差動コイル型が良好な探査機能を有し、特に導電率が最も大きい銅版に対して良好な結果を与えることを意味する。skin depthを勘案すれば、導電率が最も大きい銅版に対して背面欠損探査感度は低下すると考えられるが、現実には、単純な1次元の表皮効果で議論できる程単純でないことを意味する。

以上の検証実験結果から、以後、両端に励磁コイル、中央に差動コイルを配置した中心差動コイル型磁気センサーを採用することとする。また、磁性体で有る鉄板は渦電流による磁束分布よりも磁性体の存在による磁束分布が支配的となり、従来のECTプローブと同様に何らかの方途を勘案しなければならない。

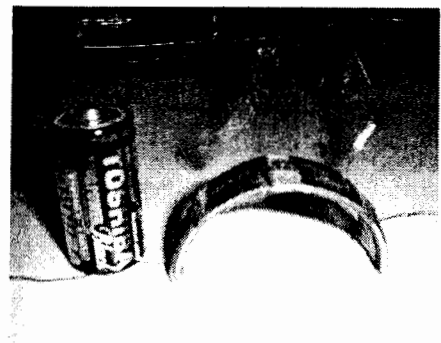


図7 作成した差動コイル型磁気センサー
Fig. 7 Tested central differential coil type ECT probe

3. 貫通・半貫通欠損探査

3. 1 センサーの構造

表2は試作中心差動コイル型センサー及び測定ターゲットの諸定数を示す。図7は試作センサーの写真を示す。

表2 試作ECTプローブの諸定数
Table 2 various constants of the tested ECT probe and the target materials.

	Exciting coils	Search coils
Diameter of the winding coils	0.4[mm]	0.2[mm]
Number of turns	50[turn]	65[turn]
Thickness of the target metallic materials	Aluminum: 0.5[mm] 1[mm] Copper: 0.5[mm] 1[mm]	

3. 2 貫通欠損探査

表1および図7に示す試作ECTプローブと供試材料を用いて、貫通欠損探査を行った。

図8に示すように、実際の直線状貫通欠損を幅0.5,1,5mm, 深さ0.5,1mmのスリットで模擬した。供試プローブをスリットから2cm離れた左端から1cmずつ欠損に対し水平方向に走査させ、サーチコイルから検出される誘起電圧の変化を測定した。検査対象材料は表1に示す厚みの異なるアルミ版と銅版である。また、励磁コイルには100kHz, 0.5Aを通电させている。図9は探査結果である電圧分布を示す。図9の結果から、アルミニウムで最も厚みの薄い0.5mmの場合、本来2箇所ピークが電圧分布に存在すべきであるが、1箇所のみを持つ電圧分布となる。他方、導電率の大きい銅版で、厚みが最も薄い0.5mmの場合、本来2箇所ピークが電圧分布に存在すべきである。しかし、3箇所のみを持つ電圧分布となる点が興味深い。

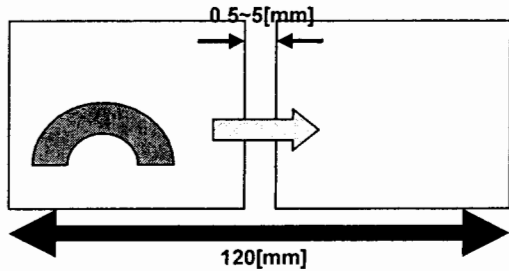


図8 貫通欠損探査実験の概念図

Fig. 8 Schematic diagram of the piecing defect searching tests.

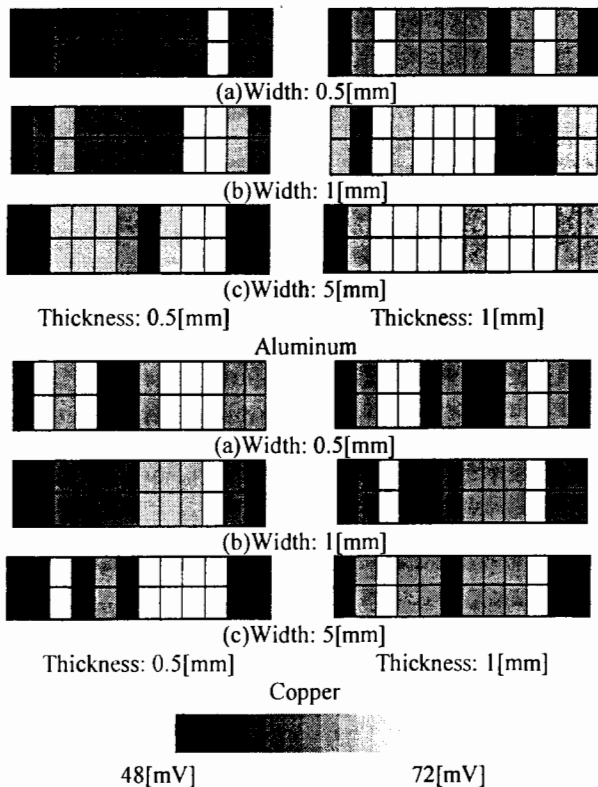


図9 貫通欠損が存在する場合の出力電圧分布
Fig. 9 Output voltage distributions along the surface with the piecing defects.

以上の結果から、筆者らの提案するECTプローブは従来のECTプローブと異なり、より表皮効果が顕著となる導電率の高い材料に対して高感度で貫通欠損を探査可能と考えられる。

3. 3 非貫通欠損探査

図10に示すように、実際の直線状非貫通欠損を幅0.5,1,5mm, 深さ0.5,1mmのスリットで模擬し、欠損の深さは1mmと0.5mmの厚さの異なる検査対象版を2枚重ねることによって33%と66%欠損深さを模擬した。

実験は3.2節と同様に走査範囲を12cmとし、供試プローブを1cm間隔で左方から右方向へ走査して出力電圧を測定した。励磁条件も3.2節と同様で、励磁コイルへ100kHz, 0.5Aを通电した。

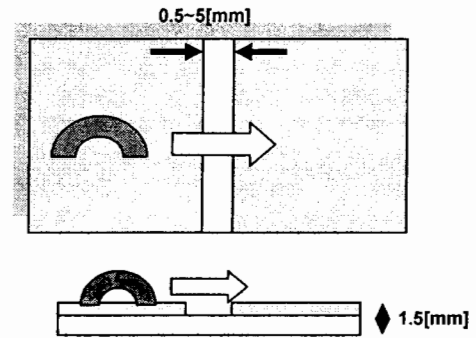


図10 非貫通欠損探査実験の概念図

Fig. 10 Schematic diagram of the non-piecing defect searching tests.

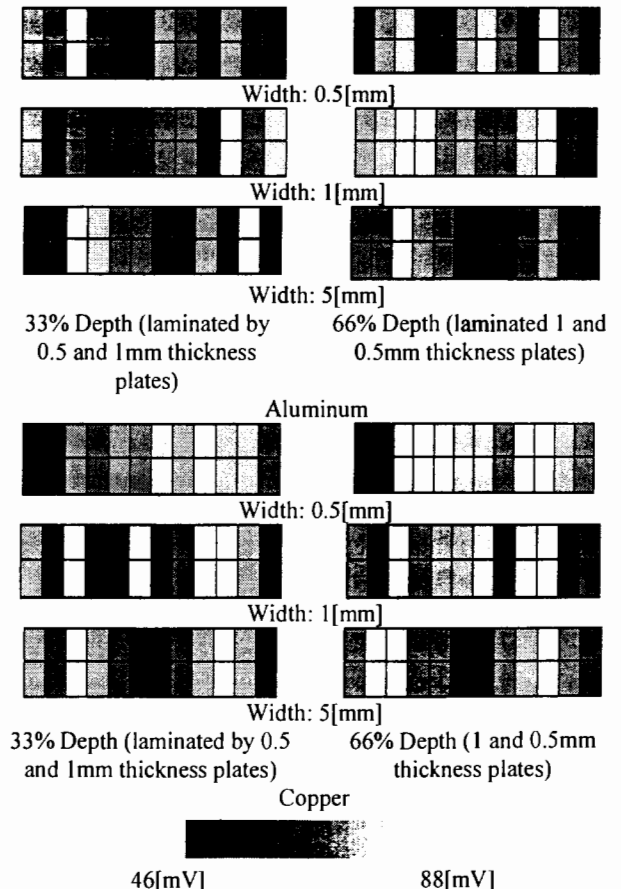


図11 非貫通欠損が存在する場合の出力電圧分布
Fig. 11 Output voltage distributions along the surface with the non-piecing defects.

図11は非貫通欠損に対する実験結果で有る。非貫通欠損の場合、検査対象金属の導電率の相違が出力電圧分布に直接反映せず、欠損の深さに反映することが図11の結果から判る。

また、33%の欠損深さで有っても、供試プローブの持つ2点探査機能の何れかに探知されることも判る。換言すれば、筆者らの提案するECTプローブが持つ特長が反映され、比較的浅く狭い欠損も探知可能で有ると考えられる。当然であるが、欠損の幅が広がる程明確に2点ピーク電圧分布として探査されることが判る。

4. まとめ

本論文では、筆者らが従来から提案してきた電流分布探査センサーであるカレントビューアをアクティブ型渦電流センサーとして利用する方法を提案した。

カレントビューアはアンペアの法則を直接利用して電流を測定するロゴスキーコイルを変形したセンサーで有る。このカレントビューアの両脚に励磁コイルを配置し、中心部に差動コイルを配置した中心差動型 ECT プローブは、センサー端子が両脚に存在するため、1ヶ所の欠損に対して2回走査を可能とする。この結果、従来型に比較してより信頼性の高いECTプローブ実現の可能性が判明した。

参考文献

- [1] 橋本光男：「原子炉構造機器の電磁現象を応用した欠陥診断法に関する研究」，東京大学学位論文(1990)
- [2] Y. Fujita, Y. Terashima, I. Sasada and T. Noda: "Flaw detection from ferromagnetic metal using a Dahle-type probe with orthogonal fluxgate pick up one world" Magnetic Society of IEEJ, MAG-01-217(2001-12)
藤田 穰・寺島義浩・笹田一郎・野田 保：「フラックスゲートを組み込んだ Dahle 型プローブによる強磁性体の傷検出」，電気学会マグネティクス研究会資料，MAG-01-217(2001-12)
- [3] H. Urada, Y. Ichimaru, and I. Sasada: "Fabrication of a multi-channel micro magnetic probe" Magnetic Society of IEEJ, MAG-01-218(2001-12)
浦田秀行・市丸 靖・笹田一郎：「多チャンネル化マイクロ磁気プローブの試作」，電気学会マグネティクス研究会資料，MAG-01-218(2001-12)
- [4] Y. Saito, T. Kamesawa, and Y. Yutaka: "Three Phase Magnetic Sensor" , T.IEE Japan, Vol.115-A, No.10, pp956-961(1995 - 10)
斎藤兆古・亀澤高志・平間 豊：「三相交流磁気センサ」，電学論 A, 115, 10, pp956-961(1995 - 10)
- [5] M. Aoki, H. Endo, S. Hayano, and Y. Saito: "Eddy current testing by the modified Rogowski coil" , JSAEM, Vol.11,pp29-33(2000 - 4)
- [6] M. Aoki, S. Hayano, and Y. Saito: "Measurement of 2D current distribution by current viewer" Magnetic Society of IEEJ, Mag-99-150(1999-11)
青木 誠・早野誠治・斎藤兆古：「カレントビューアによる2次元電流分布の測定」，電気学会マグネティクス研究会資料，MAG-99-150(1999-11)
- [7] A. Hirota, S. Hayano, and Y. Saito: "Current Visualization by Vector Current Viewer" ,Magnetic Society of Japan, Vol.22, Suppl, No.1, pp81-84(2002-7)
廣田章博・早野誠治・斎藤兆古：「ベクトルカレントビューアによる電流分布の可視化」，可視化情報学会，Vol.22, Suppl, No.1, pp81-84 (2002-7)

原稿受付日	平成 14 年 10 月 22 日
-------	-------------------